

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

ВО ЗУЙ ФУК

УДК 621.37:621.391

**ІДЕНТИФІКАЦІЙНІ ОЗНАКИ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ
ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЕМАСКУЮЧОГО РОЗСІЮВАЧА В НЕЛІНІЙНІЙ
РАДІОЛОКАЦІЇ**

Спеціальність 05.12.17 - Радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ-2018

Дисертація є рукопис.

Робота виконана на кафедрі радіоконструювання та виробництво радіоапаратури в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Зінковський Юрій Францевич,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського", професор кафедри
радіоконструювання і виробництва
радіоапаратури

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, с.н.с.
Нікітенко Юрій Гордійович,
Державне підприємство Науково-дослідний
інститут радіолокаційних систем
«Квант - Радіолокація»
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук, доцент
Швець Валеріян Анатолійович,
Національний авіаційний університет
Інститут інформаційно-діагностичних систем,
завідувач кафедри засобів захисту інформації

Захист відбудеться «19» лютого 2018 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.14 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 249.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «29» грудня 2017 р.

В.о. вченого секретаря спеціалізованої
вченої ради
д.т.н., проф.

С.Я. Жук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нелінійна радіолокація використовується у багатьох областях (промисловість, технічний захист інформації, військова справа та інші).

За напрямком нелінійної радіолокації працювали водомії дослідник Штейншлейгер В.Б., Вернигоров Н.С., Парватов Г.Н., Петров Б.М., Горбачев О.О., Шифрін Я.С., Thomas H. Jones, Bruce R. Barsumian, Robert A. Rubega та інші. В Англії - James H. Stephen, John D. McCann, Steven John Holmes, Andrew Barry Stephen та інші.

Нелінійний радіолокатор, як засіб пошуку прихованих електронних пристроїв, є складною технічною системою, що оцінюється багатьма показниками якості. Нелінійні радіолокатори (НР) за показниками ефективності використання (дальності дії, роздільної здатності, вибіркової тощо) відповідають вимогам нормативного документа технічного захисту інформації НД ТЗІ 1.4.-002-08 «Радіолокатори нелінійні. Класифікація. Рекомендовані методи та засоби випробувань».

Первинні демаскуючі ознаки зворотять випромінювання (кратні гармоніки частоти моногармонічного зонduючого сигналу (ЗС), комбінаційні частоти у випадку бігармонічного ЗС) притаманні двом класам нелінійних розсіювачів (НРс) - напівпровідниковим НРс (мають у своєму складі радіоелектронні напівпровідникові елементи) та структурам типу «метал-окисел-метал» (МОМ-структури), і відрізняються лише рівнями спектральних складових (нелінійних продуктів) сигналу відгуку (СВ), які для цих випадків співрозмірні з шумом. Недостатньо вивчена фізика процесів формування СВ при опроміненні системами нелінійної радіолокації досліджуваного нелінійного об'єкта.

Актуальність роботи полягає у підвищенні достовірності виявлення демаскуючих ознак напівпровідникових НРс з метою збільшення ефективності використання нелінійних радіолокаторів для пошуку закладних пристроїв у сфері технічного захисту інформації. Дослідження демаскуючих ознак передбачає аналіз ефектів у напівпровідникових структурах НРс під час дії відносно потужного ЗС НР.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

Результати дисертації отримані в процесі виконання науково-дослідних робіт в період з 2014р. по 2017р. на кафедрі радіоконструювання та виробництво радіоапаратури в рамках ініціативної науково-дослідної роботи, а саме «Підвищення ефективності пристроїв і систем нелінійної радіолокації» (номер держреєстрації 0116U008462). Також проводились роботи в НДЦ "ТЕЗІС" НТУУ «КПІ» (в рамках угоди №6007 від 15.10.2007р. про спільну діяльність між радіотехнічним факультетом НТУУ «КПІ» та НДЦ «ТЕЗІС» КПІ ім. Ігоря Сікорського) та з підприємствами ППРІАС проведення досліджень засобів відео – термінального комплексу (договір 10816Л від 27.12.2016р.), ТОВ «Амріта комплексні системи» проведення досліджень засобу електронного-обчислювальної техніки (договір 4817Л від 08.08.2017р.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є теоретичне та експериментальне дослідження структури відгуку нелінійного розсіювача під дією

нелінійного радіолокатора на предмет забезпечення ефективної ідентифікації останнього.

Для досягнення цієї мети вирішувалися такі завдання:

- Виявлення радіоелектронних закладних пристроїв в сфері технічного захисту інформації
- Ефективність виявлення закладних пристроїв на базі тунельних діодів
- Імітаційні дослідження явища інверсії у співвідношенні рівнів гармонік спектру розсіяного нелінійним об'єктом сигналу відгуку
- Сертифікація нелінійного радіолокатора по достовірності ідентифікації розсіювача з флуктуючими рівнями гармонік в спектрі сигналу відгуку

Об'єктом дослідження є нелінійного радіолокатора, що формує інформативні відгуки розсіювачів.

Предметом дослідження є спектральна структура відгуку розсіювача під час дії зонduючого сигналу нелінійного радіолокатора.

Методи дослідження. Проведений аналіз публікацій за тематикою нелінійної радіолокації для визначення напрямків, задач та методів досліджень у роботі. Використано теорії нелінійних кіл, функцій комплексної змінної, диференційного та інтегрального числення для математичного моделювання внутрішніх процесів у кремнієвих напівпровідниках та структурах типу «метал–окисел–метал» при дії відносно потужного електромагнітного НВЧ поля. Моделювання процесів розсіювання нелінійних продуктів сигналу відгуку НРс виконано за допомогою методів використання функцій Гріна.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено метод опорних параметрів для виявлення та ідентифікації ЗП на базі тунельних діодів, який відрізняється тим, що введена в нормований простір апроксимуюча площа амплітуд наведеного сигналу в функції ширини області негативного диференціального опору, щодо якої виконується перевірка надійності демаскуючої ознаки.

2. Виявлено причини ненадійного використання методів нелінійної локації при виявленні ЗП на базі тунельних діодів або чутливих до впливу потужного зонduючого сигналу напівпровідникових структур в складі розсіювача. Причини пропуску нелінійним локатором шуканих об'єктів пов'язані з ефектом інверсії демаскуючої ознаки сигналу відгуку розсіювача через наявність області з негативним диференціальним опором при N-подібних вольт-амперних характеристиках нелінійних елементів (в складі розсіювача).

3. Створено універсальну модель ВАХ, що описується одним параметром – ступенем близькості до рівноважного стану напівпровідникової приладу, яка описує сімейство деформованих кривих ВАХ напівпровідникової структури в складі розсіювача під впливом потужного зонduючого сигналу. Завдяки запропонованій моделі ефективно виявляється ефект інверсії демаскуючої ознаки і оцінюється надійність функціонування нелінійного локатора.

4. Проведено оцінку впливу асиметрії ВАХ структур «метал-окисел-метал» на ефективність використання нелінійних локаторів. Встановлено, що явні асиметрії ВАХ служать причиною помилкової ідентифікації розсіювачів і можуть

суттєво ускладнити використання нелінійних локаторів в польових умовах, якщо антени пристрою мають неподавленою бічні пелюстки діаграми спрямованості.

5. Розроблено універсальний імітатор закладного пристрою на базі плоскої спіральної двозаходової антени з нелінійним навантаженням і можливістю варіювання напруги робочої точки. Режими універсального імітатора дозволяють відтворити розсіюючі властивості закладних пристроїв, що робить імітатор об'єктивним при сертифікації нелінійних локаторів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено універсальний імітатор закладного пристрою на базі плоскої спіральної двозаходової антени з нелінійним навантаженням і можливістю варіювання напруги робочої точки з метою сертифікації нелінійного радіолокатора.

2. Створено універсальну модель ВАХ, що описується одним параметром – ступенем близькості до рівноважного стану його функціонування.

3. Розроблено математичну модель ВАХ тунельного діода та метод опорних параметрів для виявлення та ідентифікації закладних пристроїв на базі тунельних діодів.

Запропоновані методи забезпечують підвищення ефективності використання нелінійних радіолокаторів у сфері технічного захисту інформації при обмеженні максимального рівня потужності зонduючого сигналу (до 500 мВт).

Експериментально підтверджено ефективність запропонованих методів, що дозволяє збільшити ймовірності виявлення, вірної ідентифікації та локалізації закладних пристроїв у сфері технічного захисту інформації.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У працях, написаних у співавторстві, особистий внесок автора такий: [1] - проведено дослідження надійності нелінійних радіолокаторів при виявленні радіоелектронних пристроїв і розсіювачів корозійного походження типу “метал-окисел-метал”, [2] – розроблено математичну модель для опису N-подібної форми вольт-амперної характеристики тунельного діода, що входить до складу розсіювача, [3] – розроблено модель універсального імітатора для дослідження ефективності нелінійного радіолокатора для виявлення та ідентифікації нелінійних розсіювачів, [4, 5] – проведено експериментальні дослідження імітатора для сертифікації ефективності нелінійного радіолокатора для виявлення та ідентифікації нелінійних розсіювачів за допомогою значення максимальної дальності виявлення імітатора, [6] – проведено математичне моделювання нелінійного перетворення полігармонічного сигналу, [7, 8, 9] – розроблено математичну модель для дослідження складу спектрального сигналу відгуку НР, [10] – розроблено модель для дослідження демаскуючих ознак закладних пристроїв в нелінійній радіолокації, [11] – розроблено модель універсального імітатора закладного пристрою в нелінійній радіолокації, [12] – введений коефіцієнт стійкості напівпровідникового приладу в складі закладного пристрою в нелінійній радіолокації, [13] – розроблено модель для дослідження демаскуючих властивостей нелінійних розсіювачів, [14] – проведено моделювання нелінійних розсіювачів типу «метал-окисел-метал», [15] – проведено дослідження електромагнітної сумісності нелінійних радіолокатора.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» РТПСАС 2014 – 2017, м. Київ, 2014 – 2017р., 1-й, 2-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (ЕМС-2015, 2016)», м. Харків, IX, X науково-технічній конференції студентів, аспірантів і викладачів радіотехнічного факультету, м. Київ, 2015 – 2016 р., V – й Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», м. Чернівці, 2016р., IEEE Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіoeлектроніки (UkrMiKo'2016/UkrMiCo'2016), м. Київ, 2016 р., XIX Міжнародній науково-практичній конференції “Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах”, м. Київ, 2017 р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 15 наукових праць, з яких 5 статей у фахових виданнях (всі включено до міжнародних наукометричних баз Web of Science, Index Copernicus International, DOAJ, РІНЦ) та 10 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний зміст дисертації викладений на 127 сторінках друкованого тексту. Робота містить 48 рисунки та 19 таблиць. Додатки розміщені на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертації, сформульовано мету і задачі дисертаційного дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну отриманих результатів та практичне значення роботи, наведено дані про особистий внесок аспіранта, впровадження результатів, їх апробацію та публікації.

У першому розділі проведено аналіз методів виявлення закладних пристроїв (ЗП). Розглянуто метод виявлення ЗП – використання нелінійного радіолокатора, що використовує демаскуючі ознаки нелінійних розсіювачів.

Основні напрямки підвищення ефективності використання нелінійного радіолокатора (НР) пов'язані з підвищенням потужності передавача та чутливості приймачів НР з впровадженням схемотехнічних та конструкторських розробок; з використанням ефективних алгоритмів обробки сигналу відгуку;

Типові закладні радіoeлектронні пристрої (РЕП) мають складну еквівалентну антену структуру з несистематизованою топологією. Якісно така "випадкова" антена є ансамблем диполів різної довжини і орієнтації. Елементарними диполями виступають виводи радіoeлектронних приладів, доріжки друкованих плат, металізовані поверхні і т.д. За співвідношенням до довжини хвилі ЗС НР антенні структури РЕП поділяються на "електричне малі" (менше на порядок та більше довжини хвилі ЗС) і "електричне співмірні". Відповідно "електричне малим" антенним структурам властива мала нелінійна ефективна площа розсіювання (НЕПР) зонduючого сигналу. Тому НРс з "малої" НЕПР характеризуються "слабким випромінюванням" НР при зондуванні. Розсіювачі з "електрично сумірними"

антенними структурами мають відносно "велику" НЕПР і випромінюють під час зондування досить потужний сигнал відгуку. Вплив зовнішніх перешкод на НРС може призводити до появи мультиплікативний складових в розсіяному сигналі, який може створити фіктивні сигнали відклику навіть при відсутності ЗС.

У другому розділі проведено дослідження ефективності виявлення закладних пристроїв на базі тунельного діоду.

При використанні НР, в основному, селекція нелінійних розсіювачів (НРс) здійснюється по співвідношенню рівнів прийнятих другої і третьої гармонік. Для напівпровідникових НРс рівень другої гармоніки перевищує рівень третьої на 20...40 дБ. У разі МОМ-структур виконується зворотне співвідношення. Ідентифікаційний ознака відображає несиметричність вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових приладів (рис. 1) в складі ЗП і симетричність ВАХ розсіюючи МОМ-структур (рис. 2, контакт сталевих куль радіусом 3 мм, поверхня яких після полірування окислена на повітрі протягом 8 годин при 400 °С).

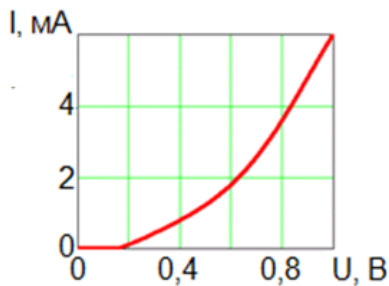


Рис. 1. ВАХ напівпровідникового приладу на прикладі діода типу 3А114А

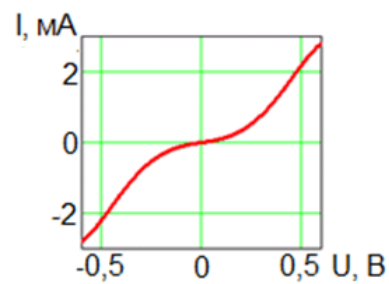


Рис. 2. Форма ВАХ контакта сталевих куль з окисленою поверхнею

Для дослідження впливу форми ВАХ нелінійних приладів і МОМ-структур на співвідношення рівнів НП в спектрі перетвореного сигналу використаний метод апроксимуючих функцій.

Для оцінки рівнів нових спектральних складових виконана апроксимація ВАХ (рис. 1 и 2) поліномами n -го порядку. Апроксимація передбачає формування системи з n рівнянь виду:

$$I(U)_n = a_1 U + a_2 U^2 + a_3 U^3 + \dots + a_{n-1} U^{n-1} + a_n U^n, \quad (1)$$

де a_1, \dots, a_n – коефіцієнти апроксимації.

Прийнято, що при моногармоніческом впливі ЗС на НРС в навантаженні виникає напруга

$$U(t) = U_0 + U_m \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (2)$$

де U_0 – напруга зсуву робочої точки в область від'ємного диференціального опору (ВДО), U_m – амплітуда наведеної напруги ЗС НР, ω_0 – кругова частота ЗС НР, φ – фаза. Підставивши (2) в (1) отримаємо апроксимуючі функції рівнів спектральних компонент на другий і третій гармоніках:

$$\begin{aligned} I_2^{A(\Pi)}(2\omega_0) &= a_2 0,5 U_m^2 + a_3 \cdot 1,5 U_0 U_m + \\ &+ a_4 (3 U_0^2 U_m^2 + 0,5 U_m^4) + a_5 \cdot 5 (U_0^3 U_m^2 + 0,5 U_0 U_m^4), \end{aligned} \quad (3)$$

$$I_3^{A(\Pi)}(3\omega_0) = a_3 0,25U_m^3 + a_4 U_0 U_m^3 + a_5 (2,5U_0^2 U_m^3 + 0,312U_m^5), \quad (4)$$

де a_2, \dots, a_5 відповідають коефіцієнтам апроксимації ВАХ; індекси «А» і «П» позначають режими роботи НРС – активний і пасивний. (останній – це такий коли постійно не знаходиться під дією напруги).

На рис. 3 в якості прикладу для $U_0 = 0,2$ В и $U_m = 0,3$ В наведені розраховані по (3) и (4) рівні другої і третьої гармонік вторинного сигналу для розглянутих ВАХ напівпровідникового приладу і МОМ-структур. У разі несиметричною характеристики робоча точка знаходиться на нелінійному ділянці (криві I_2^A р-п и I_3^A р-п), рівень другої гармоніки перевищує рівень третьої на 20...40 дБ. При відсутності зміщення робочої точки на ВАХ діода рівні другої і третьої гармонік при малих амплітудах індукваного сигналу «квазірівні» один одному (криві $I_2^П$ р-п и $I_3^П$ р-п).

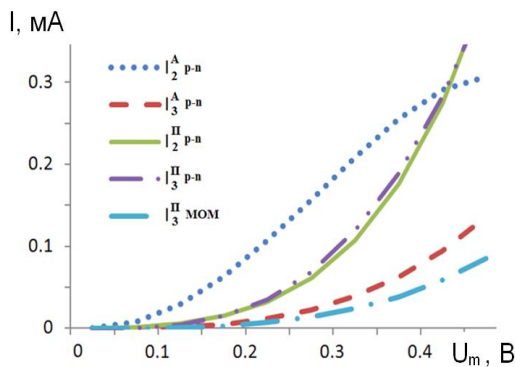


Рис. 3. Вплив амплітуди U_m на рівні гармонік

Для симетричної характеристики при нульовому зміщенні робочої точки проявляється лише третя гармоніка (крива $I_3^П$ МОМ). При неідеальній симетричності ВАХ для МОМ-структури рівень третьої гармоніки перевищить рівень другий на 10...30 дБ.

Таким чином, надійність виявлення та ідентифікації НРС по співвідношенню рівнів другої і третьої гармонік визначається формою ВАХ напівпровідникового приладу або МОМ-структури, амплітудою індукваного сигналу і зміщенням робочої точки. Для розглянутих ВАХ труднощі в ідентифікації матимуть також місце при «квазірівності» гармонік розсіяного сигналу.

Розглянуто два типи тунельних діодів, які використовують в схемах: Д951Б и АИ201А. Виконавши апроксимацію поліномом п'ятого порядку їх ВАХ (рис. 4), за

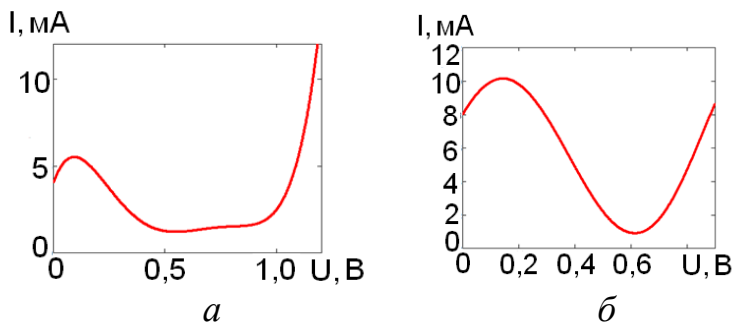


Рис. 4. ВАХ тунельних діодів:
а) Д951Б, б) АИ201А

виразами (3) и (4) розраховані рівні другої і третьої гармонік перетвореного ними сигналу (2). При цьому враховано, що значення амплітуди індукваного в НРС сигналу U_m визначається ефективною площею розсіювання закладного пристрою і потужністю ЗС розсіювача. Величина прийнятої ЗП потужності в процесі пошуку

варіюється, що призводить до зміни U_m . Залежність співвідношення рівнів другої і

третьої гармонік від амплітуди наведеної напруги представлена на рис. 5. Існують такі значення U_m , коли співвідношення рівнів гармонік менше (рівне) одиниці ($I_3 \geq I_2$), тобто спостерігається інверсія ідентифікаційної ознаки НРС.

Проведено дослідження на значній вибірці з 25 зразків різних типів тунельних діодів. Серед характеристик ВАХ виділимо ширину області ВДО δU , максимальний екстремум (далі максимальний струм I_{\max}) і мінімальний екстремум (далі мінімальний струм I_{\min}). Значення ширини δU на ВАХ розглянемо як різниця $\delta U = U_{B3} - U_{B1}$, де U_{B1} – напруга при I_{\max} , U_{B3} – напруга при I_{\min} .

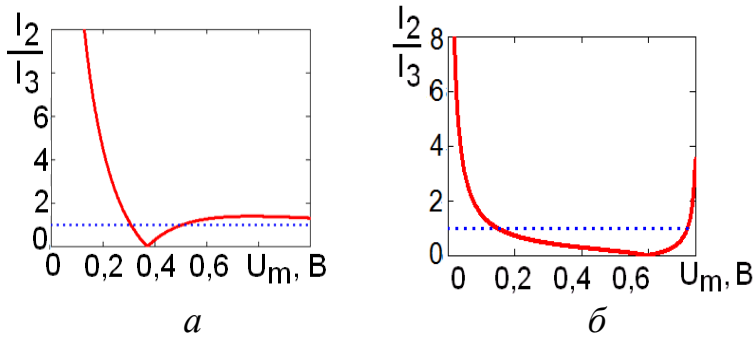


Рис. 5. Залежності I_2/I_3 от U_m при $U_0 = 0,35$ мВ: а) Д951Б, б) АИ201А

Розглянута в відносних координатах область НДО, яка представлена її апроксимуючої функцією (рис. 7).

$$I_{\text{ВД}} = 0,5 \cdot (1 - \text{th}(k(\delta U_{\text{ВД}}) \cdot (U_{\text{ВД}} - 0,5))), \quad (6)$$

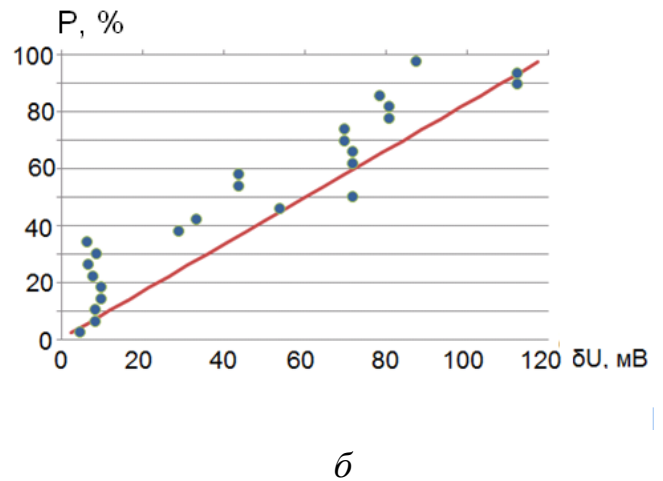
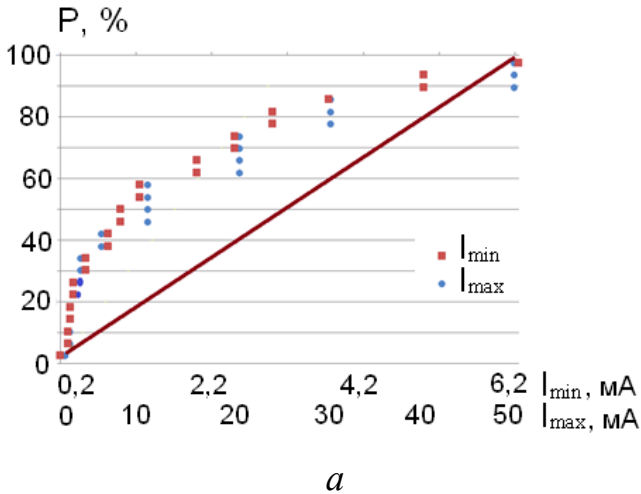


Рис. 6. Кумулятивні функції розподілу : а) I_{\min} и I_{\max} б) δU

де $k(\delta U_{\text{ВД}}) = 640 \cdot 2^{-10 \cdot \delta U_{\text{ВД}}} \cdot \sin(\delta U_{\text{ВД}})$ – масштабуючи коефіцієнт, в межах $\delta U_{\text{ВД}} = 0,2 \dots 0,4$ похибка не перевищує 1%. Застосувавши до (6) розкладання Тейлора п'ятого порядку і підставивши в якості змінної функцію (2) в відносних значеннях, отримаємо вирази для рівнів другої і третьої гармонік – $I_2(U_{\text{ВД}}, U_{0\text{ВД}}, U_{m\text{ВД}})$ и $I_3(U_{\text{ВД}}, U_{0\text{ВД}}, U_{m\text{ВД}})$.

На рис. 8 наведено рівні другої і третьої гармонік від ширини ВДО і амплітуди наведеного сигналу при $U_{m\text{ВД}} \geq \delta U_{\text{ВД}}$. Згідно малюнку видно, що область ВДО не призводить до порушення нерівності $I_2 \geq I_3$.

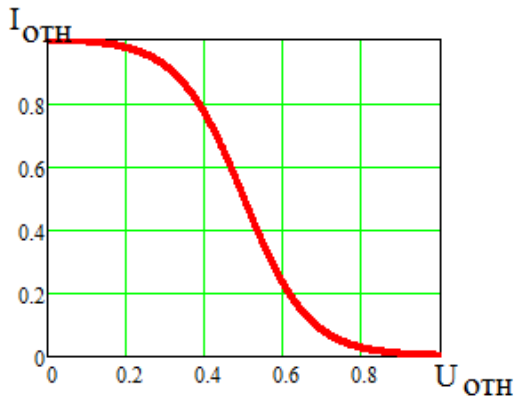


Рис. 7. Область НДО, $\delta U_{\text{ВД}} = 0,8$

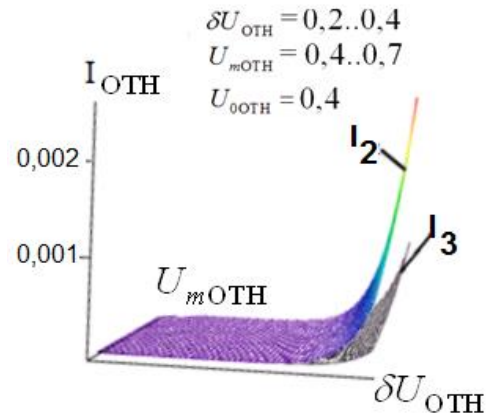


Рис. 8. Рівні другої і третьої гармонік

Нормована апроксимуюча функція N-подібної форми ВАХ тунельного діода представляється як

$$I_{\text{ВД}} = (1,5 \cdot \alpha^2 + 2,9) \cdot \sin^3(\beta \cdot U_{\text{ВД}}) - 3 \cdot \sin^2(\beta \cdot U_{\text{ВД}}) + 0,5, \quad (7)$$

вона масштабована через наведені параметри α і β таким чином, щоб охопити всі можливі співвідношення між шириною області з негативною нелінійністю $\delta U_{\text{ВД}}$ і крутизною області з позитивною нелінійністю $K_{\text{ВД}}$ (рис. 9).

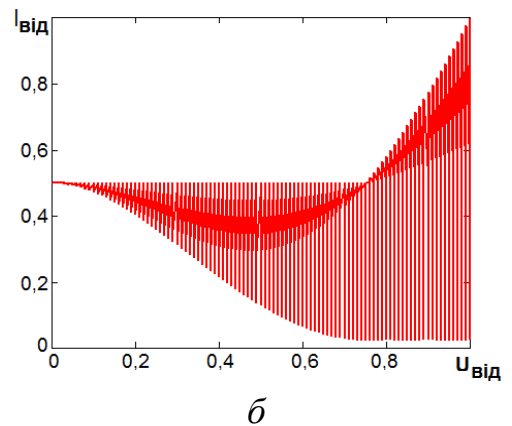
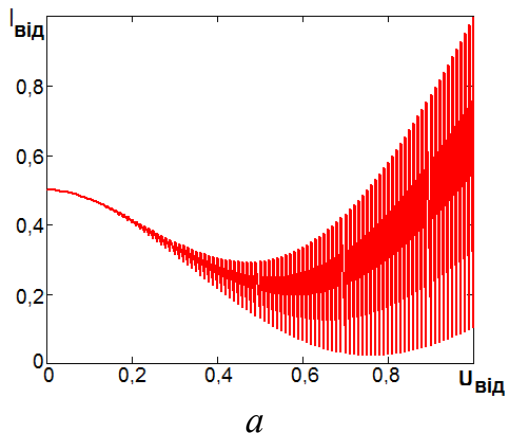


Рис. 9. Множина нормованих апроксимуючих функцій N-подібної форми ВАХ тунельного діода: а) $\alpha = 0..1$, $\beta = 1$; б) $\alpha = 0..1$, $\beta = 0..1$

Згідно рис. 9, а, при $\alpha = \text{var}$ і $\beta = \text{const}$ змінюються значення ширини області з негативною нелінійністю і крутизни області з позитивною нелінійністю, при цьому співвідношення між цими характеристиками кривої залишається постійним. Параметр α характеризує «розтягнення» нормованої кривої ВАХ уздовж осі $U_{\text{ВД}}$. У разі зміни обох параметрів α і β (рис. 9, б) зміна відбувається не тільки в значеннях $\delta U_{\text{ВД}}$ і $K_{\text{ВД}}$, але і в їх співвідношенні $\delta U_{\text{ВД}}/K_{\text{ВД}}$. Параметр β характеризує ступінь відмінності між крутизною двох областей з позитивною і негативною нелінійністю.

Розклавши вираз (7) в ряд Тейлора п'ятого порядку і підставивши $|U_{\text{ВІД}}| = |U_{0\text{ВІД}} + U_{m\text{ВІД}} \cdot \cos(\omega t)| \leq 1$, отримаємо вирази для наведених рівнів другої і третьої гармонік:

$$\begin{aligned}
 I_{2\text{ВІД}} = & -1,5 \cdot U_{m\text{ВІД}}^2 \cdot \beta^2 + 1,5 \cdot U_{0\text{ВІД}} \cdot U_{m\text{ВІД}}^2 \cdot \beta^3 \cdot (1,5 \cdot \alpha^2 + 2,9) + \beta^4 \times \\
 & \times \left(3 \cdot U_{0\text{ВІД}}^2 \cdot U_{m\text{ВІД}}^2 + 0,5 \cdot \frac{U_{m\text{ВІД}}^4}{8} \right) - \beta^5 \times \\
 & \times \frac{(1,5 \cdot \alpha^2 + 2,9)}{2} \cdot (5 \cdot U_{0\text{ВІД}}^3 \cdot U_{m\text{ВІД}}^2 + 2,5 \cdot U_{0\text{ВІД}} \cdot U_{m\text{ВІД}}^4), \\
 I_{3\text{ВІД}} = & 0,25 \cdot U_{m\text{ВІД}}^3 \cdot \beta^3 \cdot (1,5 \cdot \alpha^2 + 2,9) + \beta^4 \cdot U_{0\text{ВІД}} \cdot U_{m\text{ВІД}}^3 - \\
 & - \beta^5 \cdot \frac{(1,5 \cdot \alpha^2 + 2,9)}{2} \cdot \left(2,5 \cdot U_{0\text{ВІД}}^2 \cdot U_{m\text{ВІД}}^3 + \frac{5}{16} \cdot U_{m\text{ВІД}}^5 \right). \quad (8)
 \end{aligned}$$

Прийнявши за константи $U_{m\text{ВІД}} = 1$ і $U_{0\text{ВІД}} = 0,5$ у виразах (8), побудовано залежність співвідношення рівнів третьої і другої гармонік сигналу відгуку від параметрів α і β (рис. 10).

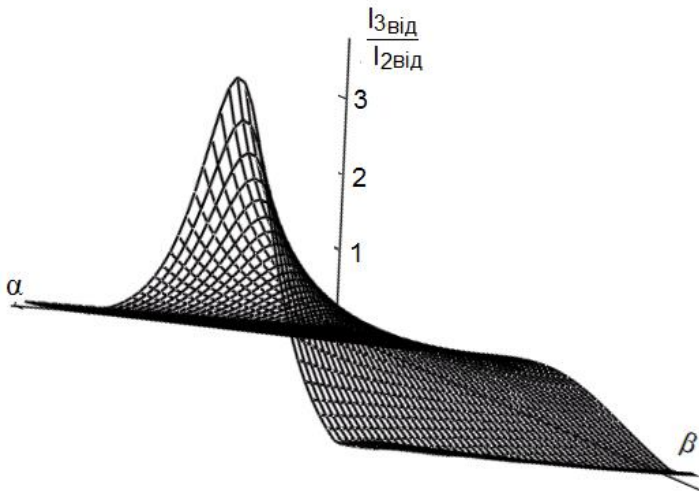


Рис. 10. Залежність співвідношення I_3/I_2 від параметрів α і β ,

Згідно рис. 10, існують значення параметрів α і β , при яких $I_3/I_2 \geq 1$. Тому, змінні α і β характеризують не тільки форму ВАХ тунельного діода, але і достовірність ідентифікаційного ознаки НРс на його базі в цілому. Залежність $N(\alpha, \beta) = I_3(\alpha, \beta)/I_2(\alpha, \beta)$ є функцією достовірності ідентифікації НРс по співвідношенню рівнів кратних гармонік. Згідно рис. 11, для закладних пристроїв на тунельному діоді, коли робоча точка знаходиться

на негативній гілці ВАХ напівпровідникового приладу ($U_{0\text{ВІД}} = 0,5$) і амплітуда наведеного сигналу порівняна (або перевищує) з шириною області ВДО ($U_{m\text{ВІД}} = 1$), $N(\alpha, \beta) > 1$ при $\alpha = 0,88..1$ і $\beta = 0,46..0,64$ (ідентифікація НРс ненадійна). Для ВАХ діода АИ201А (рис. 4) $\alpha = 0,72..1$ и $\beta = 0,45..0,67$, інверсія ідентифікаційної ознаки на нього буде при зсуві робочої точки на негативну гілку ВАХ перевищувати ширину області ВДО амплітуді впливаючого сигналу.

У **третьому розділі** проведено дослідження структури імітаторів закладних пристроїв в нелінійній радіолокації.

При використанні імітатора ЗП для визначення максимальної дальності його виявлення НР необхідно враховувати граничне значення рівня потужності ЗС. При

пошуку об'єкта від НР при фіксованій чутливості його приймального пристрою збільшення щільності потоку потужності ЗС може привести до електричного або теплового пробую напівпровідникових структур в складі імітатора.

Значення максимально можливого рівня потужності ЗС, що впливає на імітатор (при фіксованій чутливості приймача), визначається при досягненні компромісу між мінімізацією ймовірності пробую напівпровідникових елементів і максимізацією дальності дії НР по виявленню мети. Під час зондування імітатора ЗП спостерігаються зворотні деформації ВАХ напівпровідникового діода, що відбивається на енергетиці перевідбиттів нелінійних продуктів.

Деформація ВАХ напівпровідникового діода під час зондування пов'язана в першу чергу з дисипацією енергії ЗС НВЧ поля, що призводить до ефекту розігріву вільних носіїв заряду. Явище дисипації викликає порушення рівноважного стану напівпровідникової структури шляхом її розігріву. Сприйнятливість напівпровідникового діода в складі імітатора ЗП до деформації ВАХ можна визначити виразом

$$Z = \frac{(T_0 + \Delta T)/T_0}{(P_0 + \Delta P)/P_0},$$

де T_0 – температура при нормальних умовах, P_0 – максимальний рівень потужності ЗС НР, що не приводить до деформації ВАХ діода, ΔP – приріст рівня потужності ЗС НР при збільшенні температури на ΔT . Нехай $\gamma = T_0/(T_0 + \Delta T)$, γ – ступінь близькості до рівноважного стану, γ – внутрішній параметр напівпровідникової структури, що характеризує відхилення її стану від рівноважного під впливом

зовнішніх факторів, $\gamma_{\max} = 1$, γ_{\min} обмежена тепловим пробуюм.

Вище сказане вносить труднощі при оцінці ефективності НР виявляти і правильно ідентифікувати СНО.

На рис. 11 представлено сімейство деформованих ВАХ діода типу 2A604A в складі широкопasmового імітатора ЗП. В експерименті використовувався НР типу «NR-μ», імітатор був розміщений на відстані 0,5

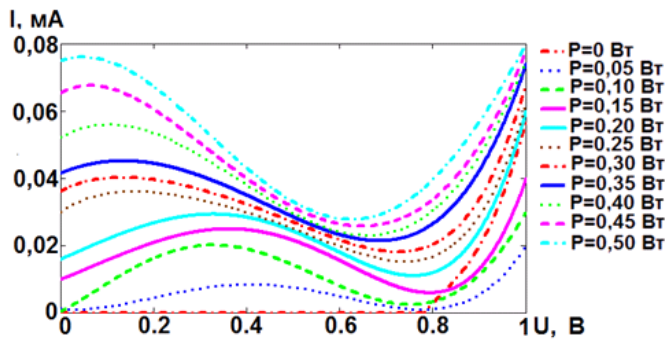


Рис. 11. Деформовані ВАХ при різних рівнях впливає потужності ЗС НР

м від випромінювача, реєстрації ВАХ з виводів СВЧ діода виконувалася за допомогою вимірювального комплексу МВУ8. При діючій потужності в діапазоні 50–500 мВт на ВАХ з'являється область з від'ємним диференціальним опором.

Пошук функціональної залежності $\gamma(P)$ припускає знаходження апроксимуючої функції сімейства деформованих кривих ВАХ. Використані нормовані експериментальні дані $I_n(U_n)$, оскільки нормована апроксимуюча функція (НАФ) має універсальність застосування при аналізі деформованих ВАХ для інших типів діодів. Змінними НАФ є: U_n – нормоване напруга напівпровідникового приладу, змінюється в інтервалі $0 \div 1$, γ_{ct} – наведена ступінь близькості до рівноважного стану,

змінюється в інтервалі $0 \div 1$, $\gamma_{ct} = (\gamma - \gamma_{\min}) / (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})$.

НАФ представлена у вигляді доданків функцій: $F = F_1 + F_2 + F_3$. Функція F_1 описує недеформованому форму ВАХ і початкову її деформацію в залежності від γ_{ct} . Функція F_2 для різних γ_{ct} описує деформацію кривої параболічної форми з піком в діапазоні напруг до точки мінімуму. Функція F_3 враховує зміну крутизни області насичення в залежності від γ_{ct} .

Нормовані експериментальні дані апроксимовані функціями:

$$F_1(\gamma_{ct}, U_{\text{н}}) = (e^{11,3 \cdot U_{\text{н}}} - 1) \cdot \gamma_{ct}^5 \cdot 10^{-5};$$

$$F_2(\gamma_{ct}, U_{\text{н}}) = 0,35714 \cdot e^{\sin([A \cdot U_{\text{н}} + B \cdot (1 - 0,25 \cdot \gamma_{ct})]^3) - C \cdot \gamma_{ct}} \cdot (1 - \gamma_{ct});$$

$$F_3(\gamma_{ct}, U_{\text{н}}) = 0,082 (e^{4,59 \cdot U_{\text{н}} \cdot (1 - \gamma_{ct})} - 1),$$

де A – параметр масштабування форми кривої вздовж $U_{\text{н}}$, B – параметр зміщення кривої вздовж $U_{\text{н}}$, C – параметр масштабування сімейства кривих уздовж $I_{\text{н}}$.

Коригувальні функції надають "гнучкість" проміжним кривим для забезпечення максимального суміщення експериментальними даними. В підсумку

$$A_{\text{опт}}(\gamma_{ct}) = 0,265 \cdot \gamma_{ct}^2 + 3,062 \cdot \gamma_{ct} + 0,584;$$

$$B_{\text{опт}}(\gamma_{ct}) = -4,229 \cdot \gamma_{ct}^2 - 1,217 \cdot \gamma_{ct} + 1,198;$$

$$C_{\text{опт}}(\gamma_{ct}) = 4,000.$$

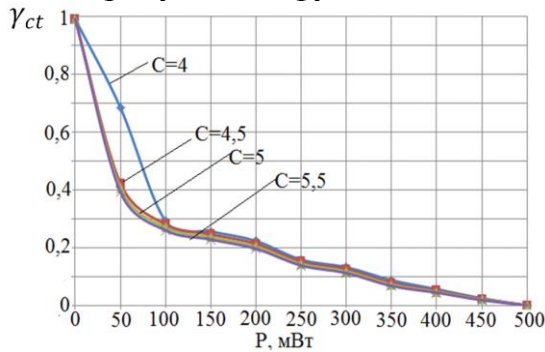


Рис. 12. Залежність приведеної ступеня близькості до рівноважного стану від рівня потужності ЗС НР

Залежність γ_{ct} від рівня потужності ЗС НР представлена на рис. 12. Відхилення параметра C в більшу сторону від оптимального значення вносить істотні зміни залежності $\gamma_{ct}(P)$ лише в області невеликих значень потужності.

Явище інверсії зручно досліджувати за «інверсних слідах» в координатах γ_{ct} , $U_{\text{мн}}$ при різних значеннях $U_{0\text{н}}$ (рис. 13), які виходять при обрисі областей, де $I_{3\text{н}}/I_{2\text{н}} \geq 1$, в результаті перетину площин двох функцій $I_{3\text{н}}/I_{2\text{н}} = f(\gamma_{ct}, U_{\text{мн}}, U_{0\text{н}} = \text{const})$ і $I_{3\text{н}}/I_{2\text{н}} = 1$.

Як видно з рис. 14, для різних $U_{0\text{н}}$ характерні свої сумарні площі «інверсних слідів» на заданому полі координат $\gamma_{ct}, U_{\text{мн}}$.

Якщо для конкретного значення $U_{0\text{н}}$ сумарну площу «інверсних слідів» розділити на площу всього досліджуваного поля значень $\gamma_{ct}, U_{\text{мн}}$, то отримаємо значення часткової відносної максимальної частоти прояви

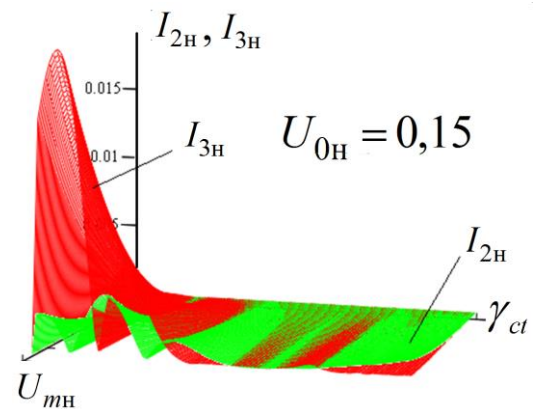


Рис. 13. Розподілу нормованих рівнів кратних гармонік

інверсії демаскуючої ознаки $\eta(U_{0H})$ в співвідношенні рівнів кратних гармонік ЗС або виходу НР в режим «рокіровки».

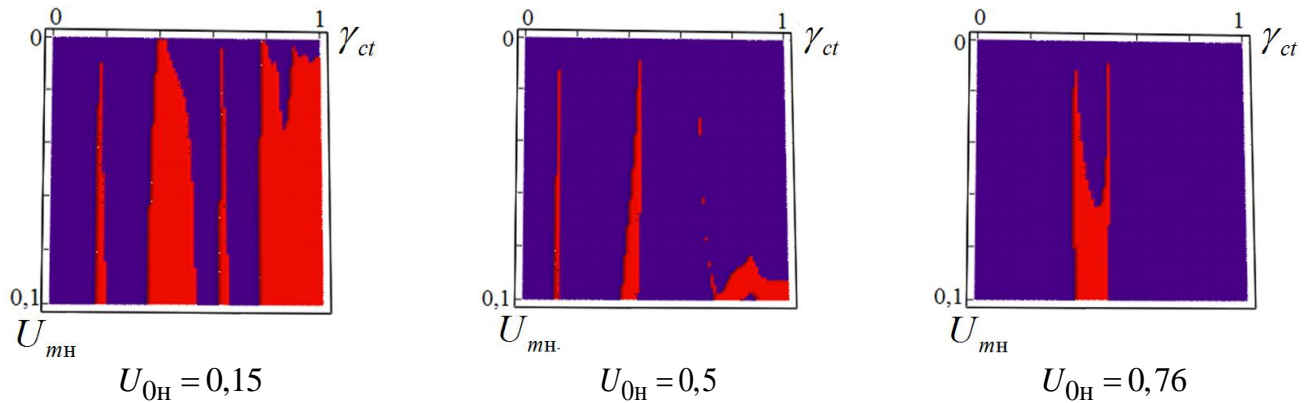


Рис. 14. Приклади «інверсних слідів» (світлі області)

На рис. 15 наведено розподіл $\eta(U_{0H})$ максимальної частоти прояви інверсії демаскуючої ознаки або виходу НР в режим «рокіровки» в залежності від нормованого значення напруги зміщення робочої точки напівпровідникового приладу.

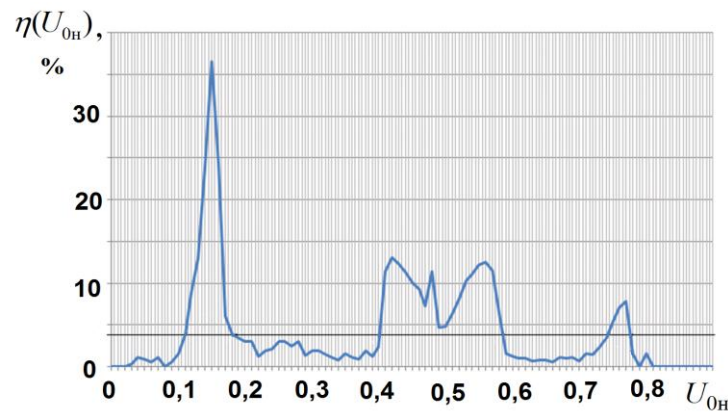


Рис. 15. Розподіл максимальної частоти прояви інверсії демаскуючої ознаки або виходу НР в «режим рокіровки» $\eta(U_{0H})$.

На отриманому розподілі $\eta(U_0)$ можна виділити три піддіапазони значень U_{0H} , де спостерігається якісно прояв інверсії демаскуючої ознаки. Характеристики піддіапазонів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики піддіапазонів

Діапазон		Середня частота, %	Приведене значення рівня 3-ої гармоніки	Приведене значення рівня 2-ої гармоніки
ΔU_{01H}	0,11...0,18	$\langle \eta_1 \rangle = 15,035$	$\langle I_{3H1} \rangle = 3,036 \cdot 10^{-4}$	$\langle I_{2H1} \rangle = 9,18 \cdot 10^{-5}$
ΔU_{02H}	0,41...0,58	$\langle \eta_2 \rangle = 9,668$	$\langle I_{3H2} \rangle = 3,216 \cdot 10^{-4}$	$\langle I_{2H2} \rangle = 1,779 \cdot 10^{-4}$
ΔU_{03H}	0,73...0,76	$\langle \eta_3 \rangle = 6,805$	$\langle I_{3H3} \rangle = 3,955 \cdot 10^{-4}$	$\langle I_{2H3} \rangle = 1,634 \cdot 10^{-4}$

Згідно з даними табл. 1 перший діапазону ΔU_{01H} має найбільшу середню частоту прояви режиму «рокіровки» для НР і найменші середні рівні прийнятих кратних гармонік сигналу відгуку. Третій піддіапазон ΔU_{03H} характеризується

найменшою середньою частотою прояви режиму «рокіровки» для НР і найбільшими середніми рівнями прийнятих кратних гармонік сигналу відгуку. Таким чином, перший і третій піддіапазони мають протилежні властивості. Другий піддіапазони за властивостями в порівнянні з першим і третім є компромісним.

З огляду на вище сказане можна стверджувати, що нелінійні радіолокатори здатні виходити в режим «рокіровки» в усіх зазначених піддіапазонах.

При зондуванні МОМ-структур спостерігається зворотне співвідношення. Причиною розглянутого демаскуючої ознаки служить відмінність у формах вольт-амперних характеристик (ВАХ) нелінійних об'єктів. Напівпровідниковим елементам в складі РЕП відповідають несиметричні ВАХ, що розсіює МОМ-структурам.

У **четвертому розділі** представлені результати експериментальних досліджень дальності виявлення розсіювача та сертифікації нелінійного радіолокатора за ефективністю ідентифікації розсіювачів.

Для визначення максимальної дальності дії НР перспективно використання розробленого імітатора РЕП на базі двозаходової плоскою спіральної антени (ПСА) (рис. 16). Вибір такої антенної системи пов'язаний із забезпеченням роботи в широкому діапазоні частот в умовах еліптичної поляризації. Спіральні антени з коефіцієнтом перекриття по частоті від 1,5 до 10 дозволяють формувати односпрямовані ДС шириною 90° – 180° з коефіцієнтом спрямованості дії (КСД) 2–8. Двозаходова ПСА імітатора ЗП спроектована на діапазон частот 0,8–3 ГГц. Параметри ПСА імітатора: кількість входів – 2; радіус 22–26 мм; кількість витків 2–3. В діапазоні частот 0,8–3 ГГц діаграма спрямованості змінюється (рис. 17, 18). На частоті 1 ГГц КСД відповідає 6,5–2,5 дБ при ширині головної пелюстки ДС 90° – 120° . На частоті 2 ГГц КСД відповідає 2,0–0,5 дБ при ширині головної пелюстки ДС 120° – 160° . На частотах вище 2 ГГц спостерігаються зменшення КСД, що викликано розширенням головної пелюстки ДС.

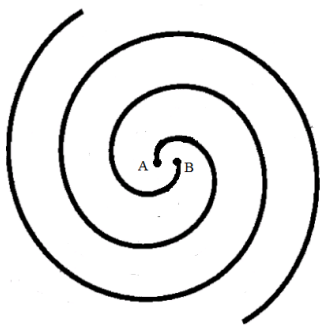


Рис. 16. Двозаходова ПСА

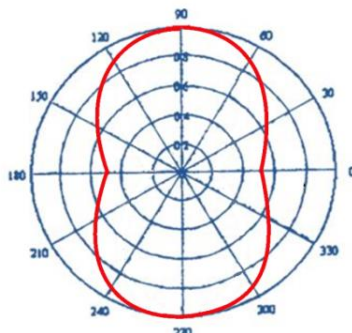


Рис. 17. ДС антени імітатора ЗП для частоти 1 ГГц

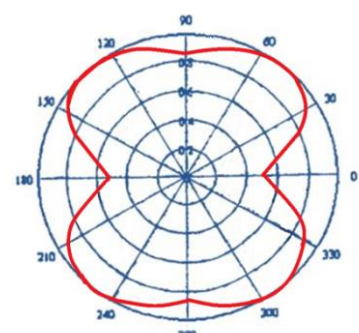


Рис. 18. ДС антени імітатора ЗП для частоти 2 ГГц

Як навантаження в точках А і В двозаходової ПСА використовується схема зі змінною ВАХ в якості нелінійного навантаження.

Розглянуті мікропотужні БІС на взаємодоповнюючих МДП-транзисторах з керуючим р-п-переходом, які поряд з малим споживанням потужності мають високу температурну стабільність і підвищені швидкодії.

БІС з дзвоноподібними ВАХ складається з двох послідовно включених взаємодоповнюючих транзисторів Т1 і Т2, як зображено на рис. 20. Затвор транзистора Т2 з'єднаний зі стоком Т1, а затвор транзистора Т1 - зі стоком Т2.

За допомогою діодів D1-D3 в схемі (рис. 19) ВАХ нелінійного навантаження для ПСА прийме N-подібну форму (рис. 20).

При моделюванні сімейства N-подібних ВАХ зручно перейти до нормованих експериментальних значень $I_N(U_N)$, оскільки нормовану апроксимуючу функцію (НАФ) легко виразити за допомогою експоненціальних функцій. Змінними НАФ є: U_N – нормоване

напруга, змінюється в інтервалі 0–1, γ_{ct} – наведений параметр деформації дзвоноподібні ділянки, змінюється в інтервалі 0–1, характеризує крутизну деформованої кривої при початку координат.

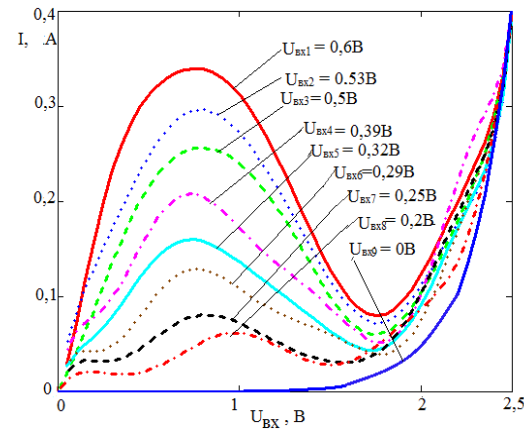


Рис. 20. Сімейство N-подібних ВАХ

Відповідність наведеного параметра входній напрузі представлено на рис. 21.

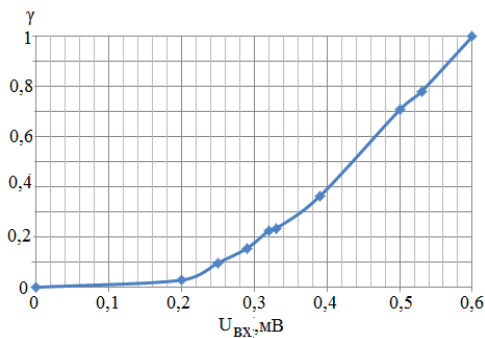


Рис. 21. Відповідність між γ_{ct} і U_{in}

НАФ представлено у вигляді доданків функцій: $F = F_1 + F_2$. Функція F_1 описує форму ВАХ р-n-переходу. Функція F_2 для різних γ_{ct} описує деформацію кривої дзвоноподібної форми.

Нормовані експериментальні дані апроксимовані функціями:

$$F_1(\gamma_{ct}, U_N) = (e^{8U_N^2} - 1) \cdot 3,2 \cdot 10^{-4};$$

$$F_2(\gamma_{ct}, U_N) = 3,45 \cdot \gamma_{ct} \cdot U_N \cdot e^{(-5,4U_N^2 + \gamma_{ct}^3 \cdot U_N)};$$

Застосовано до НАФ розкладання Тейлора (використані п'ять перших членів) і підстановку функції впливу

$$U_N(t) = U_{0N} + U_{mN} \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

де U_{0N} – нормована напруга зсуву робочої точки, ω_0 – кругова частота ЗС, φ – фаза. В результаті отримано вирази нормованих рівнів другої і третьої гармонік:

$$I_{2N} = f(\gamma_{ct}, U_{mN}, U_{0N} = \text{const}) = 0,5 \cdot K_2(\gamma_{ct}) \cdot U_{mN}^2 + 1,5 K_3(\gamma_{ct}) \cdot U_{mN}^2 \cdot U_{0N} + K_4(\gamma_{ct}) \cdot (3U_{0N}^2 U_{mN}^2 + 0,0625 U_{mN}^4) + K_5(\gamma_{ct}) \cdot (5U_{0N}^3 U_{mN}^2 + 2,5 U_{mN}^5),$$

$$I_{3N} = f(\gamma_{ct}, U_{mN}, U_{0N} = \text{const}) = 0,25 \cdot K_3(\gamma_{ct}) \cdot U_{mN}^3 + K_4(\gamma_{ct}) \cdot U_{0N} \cdot U_{mN} + K_5(\gamma_{ct}) \cdot (2,5 U_{0N}^2 U_{mN}^3 + 0,3125 U_{mN}^5).$$

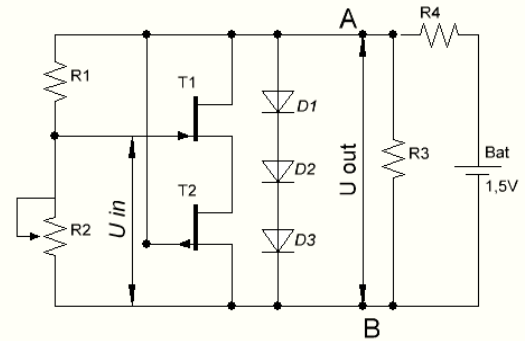


Рис. 19. Принципова схема навантаження імітатора

де $K_2(\gamma) = 3,45 \cdot \gamma^4 + 0,00256$,

$$K_3(\gamma) = \gamma \cdot (1,725 \cdot \gamma^6 - 18,63),$$

$$K_4(\gamma) = - \left[\gamma \cdot \left(9,315 \cdot \gamma^3 - 3,45 \cdot \gamma^3 \cdot \left(\frac{\gamma^6}{6} - 2,7 \right) \right) - 0,01024 \right],$$

$$K_5(\gamma) = \gamma \cdot \left[3,45 \cdot \gamma^3 \cdot \left(\gamma^3 \cdot \left(\frac{\gamma^6}{24} - 0,9 \right) - 0,9 \cdot \gamma^3 \right) - 3,105 \cdot \gamma^6 + 50,301 \right].$$

Досліджено ефективність виявлення та ідентифікації НРс щодо порогового співвідношення рівнів другої і третьої гармонік СВ. Для цього в координатах γ_{ct} , U_{mN} при $U_{0N} = 0,78$ (відповідає нелінійній ділянці недеформованою кривої НАФ) побудоване поле $I_{2N}/I_{3N} > L$ (рис. 22). Як видно з рис. 22, для різних значень L характерні свої сумарні площі областей "надійної ідентифікації" в координатах γ_{ct} , U_{mN} .

Отримані поля значень $I_{2N}/I_{3N} > L$ розділені на чотири сектори (рис. 22).

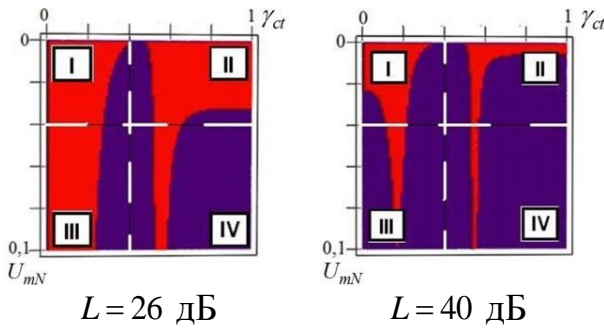


Рис 22 – Розподіл значень $I_{2N}/I_{3N} > L$ (світлі області)

Перший сектор "I" ($\gamma_{ct} \in (0; 0,4)$, $U_{mN} \in (0; 0,04)$) відповідає НРс з "малою" НЕПР при зондуванні "потужним" НР (присутня деформація ВАХ діода). Другий сектор "II" ($\gamma_{ct} \in (0,4; 1)$, $U_{mN} \in (0; 0,04)$) відповідає НРс з "малою" НЕПР при зондуванні "малопотужним" НР (відсутня деформація ВАХ діода). Третій сектор "III" ($\gamma_{ct} \in (0; 0,4)$, $U_{mN} \in (0,04; 0,1)$) відображає НРс з "великою"

НЕПР при зондуванні "потужним" НР. Четвертий сектор "IV" ($\gamma_{ct} \in (0,4; 1)$, $U_{mN} \in (0,04; 0,1)$) характеризує НРс з "великою" НЕПР при зондуванні "малопотужним" NLJD. Кожний сектор характеризується усередненою шириною $\langle \gamma_{ct} \rangle_j$ області значень $I_{2N}/I_{3N} > L$ по координаті γ_{ct} (світлі області на рис. 22), де j – порядковий індекс сектора (I, II, III и IV). Усередненим ширинам $\langle \gamma_{ct} \rangle_j$ відповідають опорні значення U_{mNj} , γ_{ct1j} и γ_{ct2j} , за якими можна визначити узагальнені властивості кожного сектора, де γ_{ct1j} и γ_{ct2j} – кордону ширини області значень $I_{2N}/I_{3N} > L$ по координаті γ_{ct} і опорного U_{mNj} , $\Delta \gamma_{ctj} = \gamma_{ct2j} - \gamma_{ct1j} = \langle \gamma_{ct} \rangle_j$. Введений коефіцієнт ефективності порогового співвідношення рівнів другої і третьої гармонік сигналу відгуку по кожному сектору

$$K_j = \frac{P_{2j} - P_{1j}}{P_{2j} + P_{1j}}.$$

Коефіцієнт K_j прямо пропорційний ширині $\Delta P_j = P_{2j} - P_{1j}$ і обернено

пропорційний середньому рівню діючої потужності $\langle P_j \rangle = [P_{2j} + P_{1j}]/2$.

Також K_j прагне до максимуму, якщо $P_{1j} \rightarrow 0$, оскільки для "малопотужних" НР поріг L служить критерієм вірною ідентифікації НРс. На рис. 23 наведено розподіл коефіцієнта ефективності порогового співвідношення рівнів кратних гармонік по секторам.

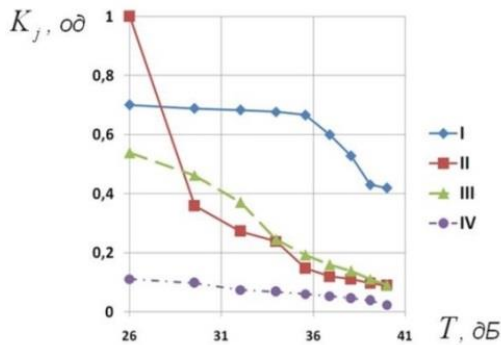


Рис. 23 – Розподіл K_j по секторам

Відношення (в %) сумарної площі ділянок в координатах γ_{ct} , U_{mN} , для яких $I_{2N}/I_{3N} > L$, до площі всього досліджуваного поля (γ_{ct}, U_{mN}) визначає ймовірність вірної ідентифікації імітатора РЕП по порогу при фіксованій напрузі зміщення U_{0N} (рис. 24.а).

Відношення (в %) сумарної площі ділянок в координатах U_{0N} , U_{mN} , для яких $I_{2N}/I_{3N} > L$, до площі всього поля (γ_{ct}, U_{mN}) визначає ймовірність вірної ідентифікації імітатора по порогу L при фіксованому входному параметрі γ_{ct} (рис. 24.б).

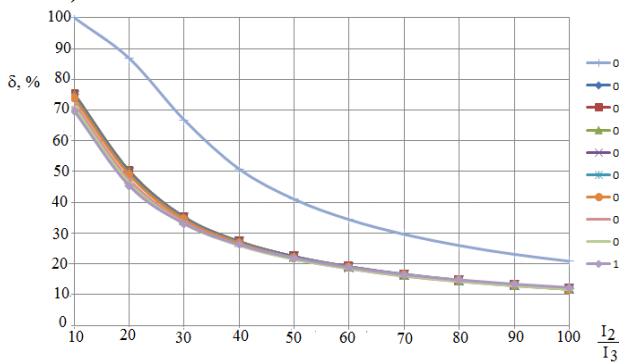


Рис. 24.а. Надійність виявлення імітатора РЕП по порогу L при $U_{0N} = 0,78$

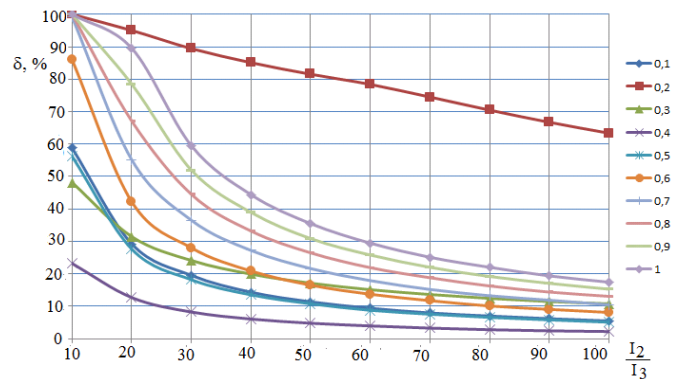


Рис. 24.б. Надійність виявлення імітатора РЕП по порогу L при $\gamma_{ct} = 0,5$

За рис. 24.а і б видно, що погіршення властивостей розсіювання імітатора можливо зі зміною $\gamma_{ct} = 0$ на $\gamma_{ct} \neq 0$ і $U_{0N} = 0,2$ на $U_{0N} = 1$.

Експериментальне знаходження максимальної відстані між НР проводилося з допомогою імітатора у вигляді двозаходової плоскої антени.

Сертифікацію НР ефективно здійснити за допомогою імітатора на базі ПСА з активною напівпровідникової структурою в навантаженні. Запропонований сертифікаційний імітатор здатний змінювати свої розсіюючі властивості, завдяки чому можливо визначити максимальну дальність надійного виявлення імітатора.

На рис. 25 представлено співставлення значимості факторів для двох експериментів, для яких розглядаються два загальних фактори: потужність діючого ЗС на НРс і значення порогу L .

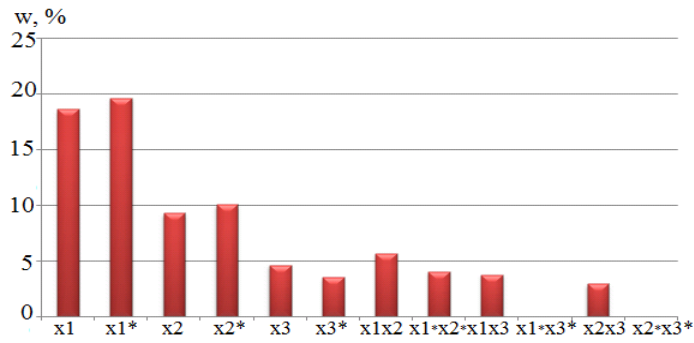


Рис. 25. Гістограми впливів факторів, де x_1, x_2, x_3 — для експериментального дослідження ефективності виявлення універсального імітатора НРс в режимах наявності і відсутності спотворення ВАХ нелінійного елемента; x_1^*, x_2^*, x_3^* , — фактори експериментального дослідження ефективності виявлення універсального імітатора НРс в залежності від величини зміщення робочої точки на ВАХ нелінійного елемента

Фактор потужності визначає можливість фізичної реалізації виявлення НРс методом нелінійної локації. Фактор порога визначає довіру до прийнятого рішення про виявленні НРс по демаскуючих ознаках, виходячи з практичного досвіду застосування НР. Оператор під час проведення експериментів керується кореляцією між рівнем потужності ЗС і значенням порога L .

Для типового НР сертифікаційні дослідження за допомогою імітатора НРс припускають дві серії випробувань.

У першій серії експериментів для мінімального значення потужності ЗС НР — P_{\min} , знаходиться мінімальний поріг L_{\min} , при якому з максимальною достовірністю виявляється імітатор на фіксованій відстані l_{\min} (0,5 м). Тут максимальна достовірність виявлення імітатора забезпечується його режимом роботи на максимальне розсіювання демаскуючої сигналу відгуку. Далі при фіксованих значеннях P_{\min} і L_{\min} знаходяться максимальні відстані виявлення імітатора в різних режимах роботи на n_1 дослідженнях, $n_1 \leq N$, N — кількість режимів γ_{ct} і $U_{0н}$. Після чого знаходиться початкова максимальна відстань виявлення НР нелінійного розсіювача:

$$\langle l_{\text{поч}} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} l_{\text{поч}i}}{n_1} \quad (9)$$

У другій серії експериментів для максимального значення потужності ЗС НР — P_{\max} , знаходиться максимальний поріг L_{\max} , при якому з максимальною достовірністю виявляється імітатор на фіксованій відстані l_{\min} . Тут достовірність виявлення імітатора забезпечується його режимом роботи на мінімальне розсіювання демаскуючої сигналу відгуку. Далі при фіксованих значеннях P_{\max} і L_{\max} знаходяться максимальні відстані виявлення імітатора в різних режимах роботи на n_2 дослідах, $n_2 \leq N$. Після чого знаходиться граничне максимальна відстань виявлення НР нелінійного розсіювача:

$$\langle l_{\text{ГРАН}} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} l_{\text{ГРАН}i}}{n_2} \quad (10)$$

За допомогою знайдених величин $\langle l_{\text{ПОЧ}} \rangle$ і $\langle l_{\text{ГРАН}} \rangle$ можна охарактеризувати пристосованість НР для роботи.

При цьому на ділянці від $\langle l_{\text{ПОЧ}} \rangle$ до $\langle l_{\text{ГРАН}} \rangle$ слід виділити три області: $(\langle l_{\text{ПОЧ}} \rangle; l_1)$, $(l_1; l_2)$ і $(l_2; \langle l_{\text{ГРАН}} \rangle)$.

Перша область $(\langle l_{\text{ПОЧ}} \rangle; l_1)$ характеризується впливом рівня потужності зонduючого сигналу на дисипативні процеси в напівпровідникових структурах НРС, в зв'язку з чим спотворення ВАХ відбувається за рахунок ефекту вільного розігріву основних носіїв заряду.

Друга область $(l_1; l_2)$ характеризується несуттєвим впливом рівня потужності зонduючого сигналу на дисипативні процеси в напівпровідникових структурах НРС.

Третя область $(l_2; \langle l_{\text{ГРАН}} \rangle)$ характеризується слабкою «вагомістю» наведеного на НРС зонduючого сигналу, через що маємо допустимо «малі» рівні випромєнених демаскуючих гармонік.

Ефективність адаптації приладу до умов роботи можна оцінити коефіцієнтом ефективного застосування:

$$K = \frac{l_2 - l_1}{\langle l_{\text{ГРАН}} \rangle - \langle l_{\text{ПОЧ}} \rangle}.$$

Найефективніший в адаптації до умов роботи прилад (НР) буде при $K \rightarrow 1$.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна наукова задача підвищення ефективності нелінійних радіолокаторів в сфері технічного захисту інформації шляхом впровадження розроблених ефективних методів виявлення, локалізації та ідентифікації нелінійних розсіювачів по демаскуючим ознакам. Основні результати і висновки, отримані в дисертаційній роботі:

1. Виявлено явище інверсії у співвідношенні рівнів гармонік розсіяного сигналу та розроблено методику локалізації та ідентифікації закладних пристроїв на базі тунельних діодів. Для дослідження впливу форми ВАХ напівпровідника на достовірність ідентифікації ЗП розроблений метод аналізу спектрального складу розсіяного сигналу з введенням апроксимуючих безрозмірних коефіцієнтів, що характеризують не тільки форму кривої, але і достовірність ідентифікації ЗП по співвідношенню рівнів гармонік демаскуючої сигналу в цілому. Методика аналізу ідентифікаційних ознак розсіювачів по співвідношенню рівнів кратних гармонік за допомогою введених параметрів дозволила розробити алгоритми мінімізації ненадійних режимів роботи НР, що істотно підвищує ефективність пошукових заходів.

2. Ідентифіковано та розроблено методику визначення явища «інверсних слідів» за допомогою введеного параметра γ , як приведену ступінь близькості до

рівноважного стану режиму роботи напівпровідникового приладу, що забезпечує достовірний аналіз вольт-амперної характеристики. Визначена нормована апроксимація функції, яка описує сімейства деформованих кривих ВАХ при різних рівнях впливів потужності зонduючого сигналу нелінійного локатора. Аналіз сімейства деформованих кривих ВАХ визначає необхідне значення параметрів, що забезпечує оптимальну наведену ступінь близькості режимів роботи напівпровідника до рівноважного стану і значення нормованої напруги напівпровідникового приладу, при яких рівень третьої гармоніки зрівнюється або переважає рівень другої гармоніки.

3. Розроблено методику визначення значення максимальної частоти прояви інверсії демаскуючої ознаки η в співвідношенні рівнів кратних гармонік ЗС і виявлений особливий режим роботи нелінійного локатора - так званним режим «рокіровки». Визначена функція розподілу $\eta(U_{0н})$ максимальної частоти прояви інверсії демаскуючої ознаки або виходу НР в режим «рокіровки» в залежності від нормованого значення напруги зміщення робочої точки напівпровідникового приладу. На отриманому розподілі $\eta(U_0)$ ідентифіковані три піддіапазони значень $U_{0н}$, де спостерігається якісно прояв інверсії демаскуючої ознаки, при якому зменшується вірогідність виявлення ЗП. Запропоновано поділ НР на три класи по ефективності їх використання: задовільні, середні і універсальні.

4. Розроблено методи виявлення, ідентифікації нелінійних розсіювачів типу МОМ-структури. Розрізнення "електронних" (напівпровідниковий прилад) і "природних" (МОМ-структури) розсіювачів можливо за допомогою аналізу співвідношення рівнів потужності другої і третьої гармонік частоти зонduючого сигналу напівпровідникового приладу і МОМ-структури. Проведено оцінку впливу асиметрії ВАХ структур «метал-окисел-метал» на ефективність використання нелінійних локаторів. Залежно від електричних режимів асиметрія проявляється в двох видах – позитивної і негативної та має явний і квазіявний прояв. Вибір оптимального порогового співвідношення між рівнями другої і третьої гармонік для підвищення ефективності НР можливий при виявленні МОМ-структур з квазіявними ВАХ обох видів.

5. Розроблено універсальний імітатор закладного пристрою на базі двозаходової плоскої спіральної антени з «керованим» нелінійним навантаженням у вигляді напівпровідникових елементів з N-подібною вольт-амперною характеристикою. Введено коефіцієнт стійкості напівпровідникового приладу з від'ємним диференціальним опором при дії ЗС НР в області ВАХ. За допомогою узагальненої нормованої апроксимаційної функції, яка описує деформації кривих ВАХ, отримана аналітична залежність нормованих рівнів другої і третьої гармонік від нормованого значення напруги і параметра деформації, що можна дослідити ефективність достовірного виявлення НРс по пороговому співвідношенню рівнів кратних гармонік сигналу відгуку. Використання порогового співвідношення дозволило використовувати його в якості критеріях достовірної ідентифікації як для "малопотужних", так і для НРс з "великою" нелінійною ефективною площею розсіювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Зінченко М.В.. Тестування нелінійних радіолокаторів на надійність ідентифікації об'єктів / М.В. Зінченко, Во Зуй Фук, Ю.Ф. Зіньковський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - 2017. - № 68. - с. 48-53 – *Здобувачем розроблено імітатор на базі плоскої двозаходової спіральної антени з напівпровідниковим діодом в навантаженні.* (Включено до наукометричних баз ВИНІТИ., Web of Science, Index Copernicus International, DOAJ, РІНЦ).
2. Зінченко М.В.. Дослідження спектральних характеристик розсіюючих МОМ-структур в нелінійній локації / М.В. Зінченко, Во Зуй Фук, Ю.Ф. Зіньковський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - 2017. - № 70. - с.11-16 – *Здобувачем досліджено надійність нелінійних радіолокаторів при виявленні радіоелектронних пристроїв і розсіювачів корозійного походження типу “метал-окисел-метал”.* (Включено до наукометричних баз ВИНІТИ., Web of Science, Index Copernicus International, DOAJ, РІНЦ).
3. Во Зуй Фук. Інверсія співвідношень рівнів гармонік демаскуючого сигналу в нелінійній радіолокації / Во Зуй Фук, М.В. Зінченко, Ю.Ф. Зіньковський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. - 2016. - № 65. - с. 119-129 – *Здобувачем розроблено математичну модель для аналізу N-подібної форми ВАХ тунельних діодів, що входять до складу розсіювача.* (Включено до наукометричних баз ВИНІТИ., Web of Science, Index Copernicus International, DOAJ, РІНЦ).
4. Зінченко М.В. Соотношения уровней гармоник рассеяного поля в нелинейной локации / М.В. Зінченко, Во Зуй Фук, Ю.Ф. Зіньковський, М.І. Прокофьев.// Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Науково технічний збірник. НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». – 2017. – Вип. 1(33). – с. 111-120 – *Здобувачем розроблено модель універсального імітатора для дослідження ефективності нелінійного радіолокатора для виявлення та ідентифікації нелінійних розсіювачів.* (Включено до наукометричних баз Ulrichweb Global Serials Directory, Base, OJS, EZB, ELAKPI).
5. Зінченко М.В.. Исследование режимов работы универсального имитатора нелинейного рассеивателя. Зінченко, Во Зуй Фук, Ю.Ф. Зіньковський // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». Хмельницький. – 2017 № 2 (58). – с. 81-86 – *Здобувачем розроблено модель імітатора для сертифікації ефективності нелінійного радіолокатора для виявлення та ідентифікації нелінійних розсіювачів .* (Включено до наукометричних баз Index Copernicus International).
6. Во Зуй Фук. Исследование нелинейного преобразования поли сигнала рядами Вольтерра / Во Зуй Фук, М. В. Зінченко , Ю. Ф. Зіньковський // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: між. науково-технічна конф., 16-22 березня 2015 р .: матеріали конференції - Київ, 2015. - С. 277-279 – *Здобувачем розроблено математичну модель для дослідження нелінійного перетворення полігармонічного сигналу.*
7. Во Зуй Фук. Обеспечение электромагнитной совместимости в системах ретрансляции радиосигналов / Во Зуй Фук, Ю. Ф. Зіньковський, М. В. Зінченко // Перша Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми електромагнітної

сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (ЕМС-2015)»: між. науково-технічна конф., 27 травня 2015-го.: матеріали конференції - Харків, 2015. - С. 43-46 – *Здобувачем розроблена математичної модель для дослідження складу спектрального сигналу відгуку.*

8. Во Зуї Фук. Влияние нелинейностей на работоспособность скрытой передачи информации / Во Зуї Фук, М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зіньковський // Друга міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (ЕМС 2016)»: межд. науково-технічна конф., 24-25 травня 2016 р. : матеріали конференції - Харків, 2016. - С. 25-29 – *Здобувачем розроблено математичну модель для дослідження спектрального складу сигналу відгуку.*

9. Во Зуї Фук. Особенности демаскирующих признаков закладных устройств на туннельном диоде / Во Зуї Фук, М. В. Зінченко // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: між. науково-технічна конф., 14-20 березня 2016 р.: матеріали конференції - Київ, 2016. - С. 219-221 – *Здобувачем розроблено модель для дослідження демаскуючих ознак закладних пристроїв на тунельному діоді.*

10. Во Зуї Фук. Достоверность демаскирующего признаки рассеивателя в нелинейной радиолокации / Во Зуї Фук, М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зіньковський // X науково-технічна конференція студентів, аспірантів і викладачів радіотехнічного факультету: науково-технічна конф., 12-13 травня 2016 р.: матеріали конференції - Київ, 2016. - С. 117-120 – *Здобувачем розроблено модель для дослідження демаскуючих ознак закладних пристроїв в нелінійній радіолокації.*

11. Во Зуї Фук. Впровадження універсального імітатора закладного пристрою / Во Зуї Фук, М. В. Зінченко, Ю.Ф. Зіньковський, М. І. Прокоф'єв // XIX Міжнародної науково-практичної конференції “Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах”, м. Київ, 23 – 25 травня 2017. – с. 121-123 – *Здобувачем розроблено модель універсального імітатора закладного пристрою в нелінійній радіолокації.*

12. Зінченко М. В.. Восприимчивость нелинейных рассеивателей к зондирующему сигналу / М. В. Зінченко, Во Зуї Фук, Ю. Ф. Зіньковський // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2016), науково-технічна конф., 11-15 вересня 2016 р, м Київ, Україна. - С. 83-86 – *Здобувачем введено коефіцієнт стійкості напівпровідникового приладу в складі закладного пристрою в нелінійній радіолокації.*

13. Во Зуї Фук. Исследование обратимости демаскирующих свойств нелинейных рассеивателей / Во Зуї Фук, М. В. Зінченко, Ю. Ф. Зіньковський // V Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передачі, обробки і збереження інформації в інформаційно-комунікаційних системах», науково-технічна конф., 3-5 листопада 2016 р, м Чернівці, Україна. - С. 146-147 – *Здобувачем розроблено модель для дослідження демаскуючих властивостей нелінійних розсіювачів.*

14. Во Зуї Фук. Нелинейная локация МОМ-структур / Во Зуї Фук, М. В. Зінченко // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: між. науково-технічна конф., 20-26 березня 2017 р. : матеріали

конференції - Київ, 2017. - С. 269-271 – *Здобувачем розроблено модель для дослідження нелінійних розсіювачів типу «метал-окисел-метал» структур.*

15. Во Зуй Фук. Исследование электромагнитной совместимости нелинейных радиолокатора / Во Зуй Фук, Зиньковский Ю.Ф.// Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: між. науково-технічна конф., 10-16 березня 2014 р. : матеріали конференції - Київ, 2014. - С. 230-232 – *Здобувачем розроблено модель для дослідження електромагнітної сумісності нелінійних радіолокатора.*

АНОТАЦІЯ

Во Зуй Фук. Ідентифікаційні ознаки спектрального складу випромінювання демаскуючого розсіювача в нелінійній радіолокації. – на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 - радіотехнічні та телевізійні системи. - Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", МОН України, Київ - 2017.

У дисертації показано, що пов'язана з виявленням демаскуючих ознак напівпровідникових розсіювачів з метою збільшення ефективності використання нелінійних радіолокаторів для пошуку закладних пристроїв у сфері технічного захисту інформації. Розроблено метод опорних параметрів для виявлення та ідентифікації закладних пристроїв на базі тунельних діодів, який відрізняється тим, що введена в нормований простір апроксимуюча площа амплітуд наведеного сигналу в функції ширини області від'ємного диференціального опору. Створена універсальна модель вольт-амперної характеристик, що описується параметром – ступенем близькості до рівноважного стану напівпровідникового приладу, яка описує сімейство деформованих кривих напівпровідникової структури в складі розсіювача під впливом потужного зонduючого сигналу. Завдяки запропонованій моделі ефективно виявляється ефект інверсії демаскуючої ознаки і оцінюється надійність функціонування нелінійного локатора. Проведені оцінку впливу асиметрії вольт-амперної характеристики структур «метал-окисел-метал» на ефективність використання нелінійних локаторів. Розроблено універсальний імітатор закладного пристрою з нелінійним навантаженням і можливістю варіювання напруги робочої точки. Режими універсального імітатора дозволяють відтворити розсіюючі властивості закладних пристроїв, що робить імітатор об'єктивним при сертифікації нелінійних локаторів.

Ключові слова: нелінійна радіолокація, нелінійний розсіювач, сигнал відгуку, нелінійні продукти, вольт-амперні характеристики з від'ємним диференціальним опором.

АННОТАЦИЯ

Во Зуй Фук. Идентификационные признаки спектрального состава излучения демаскирующего рассеивателя в нелинейной радиолокации. - на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 - радиотехнические и телевизионные системы. -

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", МОН Украины, Киев - 2017.

В диссертации показано, связанной с выявлением демаскирующим признаков полупроводниковых рассеивателей с целью увеличения эффективности использования нелинейных радиолокаторов для поиска закладных устройств в сфере технической защиты информации. Разработан метод опорных параметров для обнаружения и идентификации закладных устройств на базе туннельных диодов, который отличается тем, что введена в нормированное пространство аппроксимирующая плоскость амплитуд наведенного сигнала в функции ширины области отрицательного дифференциального сопротивления. Создана универсальная модель вольтамперной характеристик, описывается параметром - степенью близости к равновесному состоянию полупроводникового прибора, которая описывает семейство деформированных кривых полупроводниковой структуры в составе рассеивателя под влиянием мощного зондирующего сигнала. Благодаря предложенной модели эффективно проявляется эффект инверсии демаскирующего признаки и оценивается надежность функционирования нелинейного локатора. Проведенные оценку влияния асимметрии вольтамперной характеристики структур «металл-окисел-металл» на эффективность использования нелинейных локаторов. Разработан универсальный имитатор закладного устройства с нелинейной нагрузкой и возможностью варьирования напряжения рабочей точки. Режимы универсального имитатора позволяют воссоздать рассеивая свойства закладных устройств, что делает имитатор объективным при сертификации нелинейных локаторов.

Ключевые слова: нелинейная радиолокация, нелинейный рассеиватель, сигнал отклика, нелинейные продукты, вольт-амперные характеристики с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

SUMMARY

Vo Duy Phuc. Identification signs of the spectral composition of radiation of unmasking scatterers in nonlinear radar. - Manuscript.

Dissertation to submit for academic degree of candidate of engineering sciences on specialty 05.12.17 – Radio engineering and television systems. - National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute ", Kyiv - 2017.

It is shown in dissertation, which related to the detection of disabling features of semiconductor dispersers in order to increase the efficiency of the use of nonlinear radars to detect the embedded devices in the field of technical protection of information. The type of radio electronics device has a complex adequate structure of antenna with unsystematized configuration. This "random" antenna qualitatively is ensemble dipole with the different of length and orientation. The elementary dipoles are the drops of radio electronics, track circuit boards, metallized surfaces. By the ratio of the wave length probing signal nonlinear radar, the structures of antenna radio electronics device are classified as "small electrically" (less than an order of magnitude or the wavelength of probing signal is more than) and "commensurate electrically". Accordingly to the inherence of "small electrically" structure antenna, the effective square of nonlinear scattered of probing signal is small.

The influence of the external noise to non-linear scattered could get identification of multiplicative component in the scattered signal, which could create the fictitious signals of recalling even in the absence of probing signal. The frequency of interfering signal could be close to the frequency of the useful signal scattered and get into the receiver band. The fight against external interference is achieved, as a rule, selecting frequency probing signal, improving the possibility of his change and the relevant schematic and design solutions

Method of basic functions finding for similarity of the deformed curves detection and a method of the adjusting functions for minimization of an error of approximating function of nonlinear characteristics family were used for it. The current-voltage characteristics of a semiconductor diode in the scattered deformation influences on the detection range of a single broadband mortgaged device simulator in nonlinear radar. Increasing of influencing power level of the probe signal can lead to "visibility reducing" of simulator for nonlinear radar

The method of reference parameters for detecting and identifying mortgage devices based on tunnel diodes is developed, which differs by introducing into the normalized space approximating plane of the amplitudes of the signal in the function of the width of the region of negative differential resistance. Universal model of current-voltage characteristics is described, which is described by the parameter - the degree of proximity to the equilibrium state of the semiconductor device, which describes the family of deformed curves of the semiconductor structure in the composition of the diffuser under the influence of a powerful probe signal. Due to the proposed model, the effect of the inversion of a deformation trait is effectively detected and the reliability of the operation of the nonlinear locator is evaluated.

The energy dissipation of the probe signal leads to deformation of the current-voltage characteristics of the diode composed of the simulator. Parameter γ is introduced as the degree of closeness to the equilibrium state of the diode, to characterize the degree of current-voltage characteristics deformation during sensing. According to the experimental data normalized approximating function depending on the parameter γ is obtained. Identified the acquisition of unmasking properties of the structure "metal-oxide-metal" by simulator. The resulting distribution of the maximum frequency of the unmasking sign inversion occurrence depending on the normalized voltage value of operating point displacement of the diode composed of the simulator. It is suggested by the ability of nonlinear radar to capture the unmasking sign inversion of the simulator to judge the reliability of embedded devices detection and identification.

The reliability of non-linear radar at detection of radio-electronic devices and scatterers of corrosion origin of the type "metal-oxide-metal" (MOM-structures) is investigated. It is revealed that the presence of MOM-structures in the study space substantially impair the reliability of non-linear radar at revealing radio-electronic devices with the "small" non-linear effective area of dispersion of the probing signal. In this case determination of threshold levels of multiple harmonics and their ratios will not improve the efficiency of the non-linear radar use, which is associated with the peculiarities of MOM-structures current-voltage characteristics. The contacts between the metals Al, Cr, Ni have current-voltage characteristics with asymmetry, which are determined by the thickness and area of the oxide. The asymmetry can be of two types – positive and

negative. In the case of MOM-structures with a clear current voltage characteristic asymmetry of two types, the efficiency of the use of non-linear radar initially requires a significant decrease of levels of spurious emissions of the transmitting antenna.

Universal simulator of a mortgage device with nonlinear load and the possibility of varying the voltage of the working point is developed. Modes of the universal simulator are allowed to reproduce the scattering properties of embedded devices, which make the simulator objective in the certification of nonlinear locators. The reliable detection of electronic objects based on the method of identification by the ratio of levels of the re-emitted harmonics. The proposed certification of nonlinear radar uses the simulator on the basis of two-wire flat spiral antenna with a "controlled" nonlinear load. The simulator has broadband, elliptical polarization and directional power transfer. The scattering parameters of the simulator depend on the bias voltage of the working point and the input voltage of semiconductors.

Key words: nonlinear radar, nonlinear scattered, response signal, nonlinear products, current voltage characteristics with negative differential resistance.